

電着塗装シミュレーションを活用した部品形状の作り込み

Part shape design using electrodeposition coating simulation

清水 拓也

当論文は、日本プラントメンテナンス協会(JIPM)の2021年度 TPM 優秀論文賞を受賞した内容に基づくものです。

Abstract

Outboard motors are designed to pump water from around the vessels they are sailing in to help cool the engine. When used at sea, as the cooling water is sea water, the temperature of the water increases due to the heat of the engine. The cooling water passages of engine parts made of aluminum alloy are exposed to the severe corrosive environment of “high-temperature seawater,” meaning high corrosion resistance measures are required. For this purpose, Yamaha Motor has adopted a cationic electrodeposition coating system with the aim of improving corrosion resistance through forming a coating film on the intricate cooling water passages in the machine, therefore blocking the aluminum parts from direct seawater contact.

In the production preparation for electrodeposition coating, 3D CAD data is used from the design study stage, then the design department, the casting process before and after the electrodeposition coating process, and the machining process work together to create the shape of the parts.

In the production preparations to date, the deep parts of the cooling water passages have been confirmed using a prototype, with the end shape being created through trial and error. However, with more complicated shapes and new parts, there is a problem that the work so far is no longer valid and therefore the number of times required to check the product increases. In addition, as the shape change affects the redoing of performance evaluations and production preparations for other processes, there is a requirement for a rework of the product preparation.

In this paper, we introduce an electrodeposition coating simulation system to help improve the electrodeposition coating production preparation process.

1 はじめに

船外機は航行している水域の水を汲み上げ、エンジンを冷却する構造となっている。海での使用において冷却水は海水であり、エンジンの熱によって冷却水は高温となる。アルミニウム合金で作られたエンジン部品の冷却水路は「高温の海水」という厳しい腐食環境にさらされるため、高い耐食性が求められる。そこでヤマハ発動機は、複雑に入り組んだ冷却水路に塗膜を形成させ、海水からアルミ部品を遮断することで耐食性を向上させる狙いでカチオン電着塗装を採用している。

電着塗装の生産準備では、設計検討段階から3DCAD データを使用し、設計部署、電着塗装の前後工程の鋳造工程、加工工程などとともに、部品形状の作り込みを行う。

これまでの生産準備では、冷却水路の奥まった部分は、試作品による現物確認を行い、トライ＆エラーにて形状を作り込んできた。しかし、複雑な形状や新規部品では、これまでの経験が通用しなくなり、現物確認の回数が増えてしまうという問題があった。また、形状変更は、性能評価のやり直しや他工程の生

産準備にも影響があり、後戻りのある生産準備となっていた。

本稿では、電着塗装の生産準備プロセスを改善すべく、電着塗装シミュレーションの導入に取り組んだので、その概要について紹介する。

2 カチオン電着塗装の原理と付き回りについて

カチオン電着塗装とは電着塗料の中に被塗物を浸漬し、被塗物を一極、電極を＋極とし、被塗物と電極の間に電位を生じさせ、直流電流を流すことで、被塗物に＋の電荷を持った塗料粒子を析出させる塗装方法である(図1)。吹き付け塗装では塗装することが困難な複雑な内部構造にも、均一な塗膜を形成できるという特徴がある。

塗装初期では、電流は電極に近い被塗物の外面の方が流れやすく、外面に比べて内面は流れにくい。被塗物表面のある一部を見ると、塗膜が析出し、膜厚が増加することで塗膜の電気抵抗が増加し、電流量が低下する。したがって、被塗物表面に

電流が流れやすい外面から塗膜が析出し、次第に塗膜の析出していない内面へ析出が進んでいく(図2)。

この内面への塗膜の析出のしやすさ、回り込みやすさは「付き回り性」と呼ばれ、電着塗料の基本性能を表す重要な項目となっている。また、内面へ十分な電流が届かず、塗膜が形成できない不具合を「付き回り不足」と呼んでいる。

付き回りを被塗物形状から考えると、内面への開口部面積または水路断面積が小さいほど、内面へ通過できる電流量は少なくなる。したがって、入り口が狭く、奥が広がっている内部形状が付き回り不足が発生しやすい形状であり、ヘッドシリンダーや二重管構造の排気部品は特に注意が必要である。

つまり、電着塗装の付き回りは、被塗物にどう電気を流すかといった塗装条件と電着塗料の基本性能と被塗物の形状に依存していると言える。

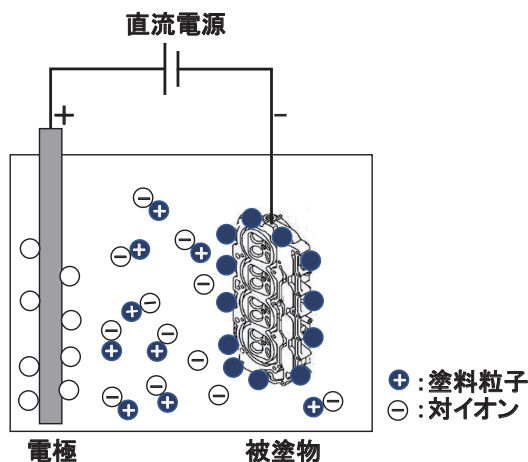


図1 カチオン電着塗装の原理

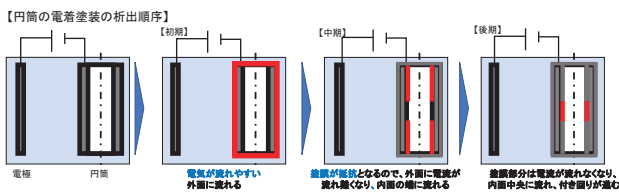


図2 付き回り性の原理

3 開発の概要

3-1. 電着塗装シミュレーションの課題

前述のように、塗装条件と塗料性能と被塗物形状によって、冷却水路の隅々まで塗膜が形成されるかの付き回りが決まる。当社は、連続処理設備のため、主要な塗装条件(例 | 電圧、電極配置、通電時間)と塗料は変更することが難しく、付き回り不足を発生させないためには、被塗物形状と一度に塗装する部

品個数でのみ調整を行える。言い換えれば、塗装条件と塗料を制約条件とし、電着塗装シミュレーションにより付き回りを評価することで、被塗物形状を作り込むことができる。

過去にも電着塗装シミュレーションの検討を実施してきた。しかし、当社は、汎用电着塗料と塗膜析出形態が異なる耐食性と付き回り性に優れた特殊な電着塗料を採用しており、特殊な塗膜析出形態によって、シミュレーションができなかった。

3-2. 船外機用の電着塗料への適用

汎用电着塗料は、ある量の電流が流れると塗膜が析出しはじめ、流れた電流に比例し膜厚が増加し、膜厚増加に比例して塗膜抵抗が増加する。したがって、汎用电着塗料用の電着塗装シミュレーションは、通電量と膜厚、膜厚と塗膜抵抗の2つの関係を実験的に求めることで塗料固有パラメータを取得し、部品形状と電着浴槽のデータをもとに電位解析を行う。各部位に流れる電流から膜厚を計算し、膜厚から塗膜電気抵抗を計算し、部品の境界条件として次ステップへ反映させ、逐次計算を進めることで、各部位の膜厚を得る手順である(図3)。

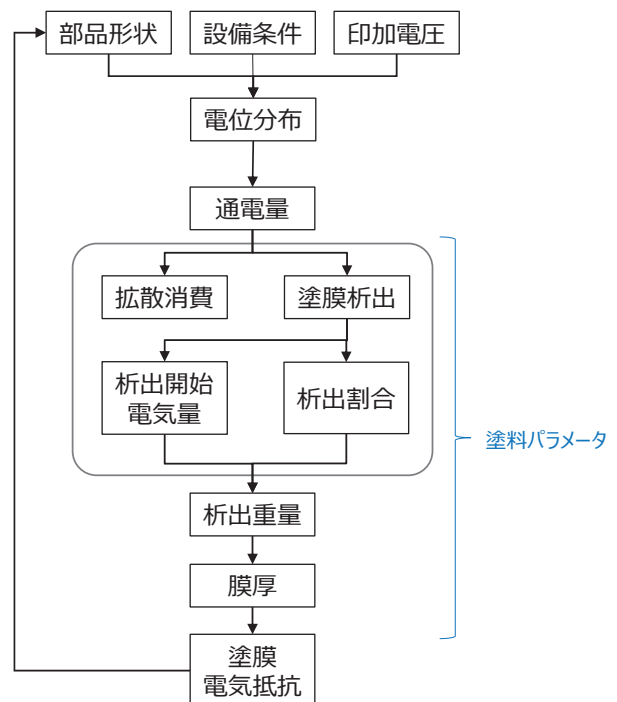


図3 汎用塗料用の電着塗装シミュレーションの概要

一方、当社の船外機用电着塗料は、付き回り性を良くするため、少量の電流で塗膜が析出しはじめ、流れた電流が膜厚増加と塗膜抵抗増加に作用する特徴を持っている。流れた電流が膜厚増加と塗膜抵抗増加の両方に作用するため、従来の電着塗装シミュレーションをそのまま適用することができない(図4)。

そこで、各要因の関係性を見直すと、通電量と塗膜電気抵抗に比例関係がみられ、汎用電着塗料の通電量と膜厚の関係に類似していることが分かった(図5)。通電量と塗膜電気抵抗の関係を直接利用し、従来の電着塗装シミュレーションソフトを改良することで、当社の船外機用の電着塗料でもシミュレーションを行うことができると考えた。

この通電量と塗膜抵抗の関係は、汎用電着塗料でも成り立つため、従来の電着塗装シミュレーションの計算をシンプルにすることができる。

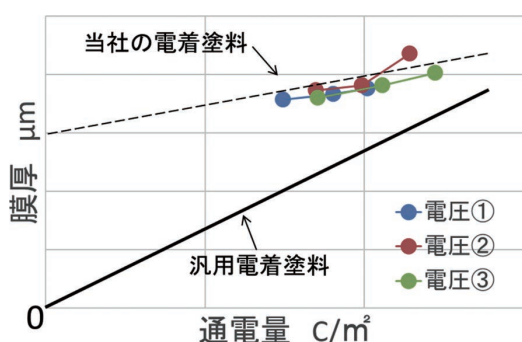


図4 船外機用電着塗料の通電量と膜厚の関係

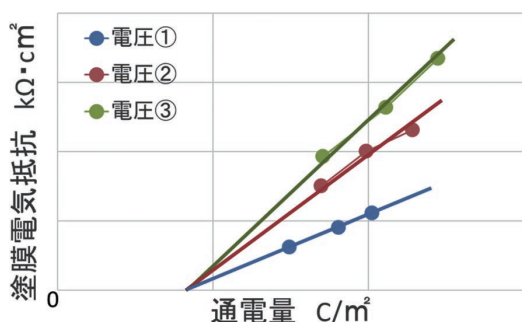


図5 船外機用電着塗料の通電量と塗膜電気抵抗の関係

4 実部品での確認

過去に生産準備の中で付き回り不足の発生した二重管構造の排気部品において、対策案の一つである電流経路のための孔を2つ開けた対策品で電着塗装シミュレーションを行った。

塗装部品を切断して付き回り不足を確認した結果とシミュレーション結果を図6に示す。部品写真のピンク色部分が付き回り不足箇所である。また、今回の電着塗装シミュレーションでは、膜厚をイメージしやすいよう、塗膜電気抵抗と膜厚の関係を以下のように定めた。

$$\text{塗膜電気抵抗 } 1 \Omega \cdot \text{m}^2 \Rightarrow \text{膜厚 } 0.1 \mu\text{m}$$

本塗料は、ある塗膜電気抵抗以上にならないと塗膜析出が

見られないことから、塗膜析出の閾値を設定した。

シミュレーション結果では冷却水路の奥まった部分での膜厚が薄くなっていることが分かり、塗膜析出の閾値以下の付き回り不足部分も確認することができた。シミュレーション結果の方が、実部品よりも付き回り不足部分が小さい結果となったが、付き回り不足の傾向は現物と一致していると言える。また、膜厚については、シミュレーション結果と実態とでは乖離があることが分かった。

膜厚には実態との乖離はあるものの、対策として開けた2つの電流経路用の孔の影響範囲を明確にすることができた。つまり、付き回り不足が発生しそうな部分の想定や形状検討は現物品が無くても行うことができると言える。

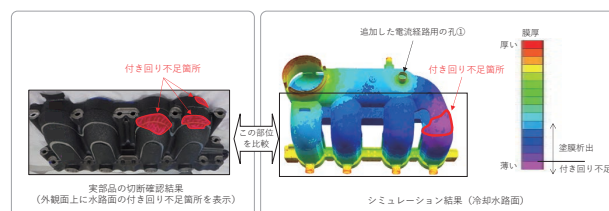


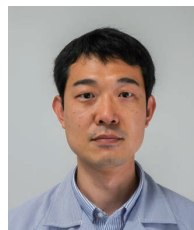
図6 二重管排気部品の実部品確認結果とシミュレーション結果の比較

5 おわりに

船外機用電着塗装の生産準備プロセスの改善として、当社船外機用の特殊な電着塗料に対応するため、通電量と塗膜電気抵抗の関係に着目し、既存のシミュレーションソフトの改良を行った。これにより、設計初期段階から船外機部品の電着塗装での問題点の抽出ができるようになり、3DCADでの部品形状の作り込みが行えるようになった。

今後もより低コストで高い品質の商品を提供できるよう、船外機用電着塗装シミュレーションを工程改善でも活用していく。

■著者



清水 拓也
Takuya Shimizu
マリン事業本部
製造統括部
マリンエンジン製造部